

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360383

研究課題名(和文)局所的密度変動の高速二次元分光計測による核融合プラズマ非接触化機構の解明

研究課題名(英文) Study on detachment scenario in fusion plasmas by the fast two-dimensional spectroscopic measurement of local density

研究代表者

宮澤 順一 (Miyazawa, Junichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50300728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：核融合炉実現に向け、プラズマ対向部(ダイバータ)の熱負荷軽減手法を確立することが急務である。本研究では大型ヘリカル装置のプラズマに対し、全長2.4 mのラバルノズルで生成した超音速ガス流を吹き付けてプラズマ外周領域の密度を局所的に増大させる実験を行った。その結果、外周領域の温度が低下し、輻射損失が増大した。超音速ヘリウムガス流がプラズマに接触し発光の様子を高速カメラで分光計測し、線強度比法によってプラズマ外周部における電子温度及び電子密度の二次元分布を評価した。電子温度は磁気面形状に類似した層状分布に、電子密度分布はガス流とプラズマの接触箇所をピークとする分布になっていることが示された。

研究成果の概要(英文)：For realization of a fusion reactor, it has been desired to establish a method to mitigate the large heat load on a plasma-facing component called the divertor. In this study, a series of experiment using the supersonic gas flow has been performed in the Large Helical Device (LHD). A long Laval nozzle of 2.4 m length was used to produce the supersonic gas flow and to increase the local edge density of the plasmas. As a result, the plasma edge temperature was decreased and the radiation loss was increased successfully. Two-dimensional profile measurement of electron density and temperature has been conducted using the supersonic helium gas flow. Three line spectra of helium have been chosen for the line-intensity ratio method. In the edge region, the electron temperature profile shows a layer structure similar to that of magnetic surfaces, while the electron density profile has a peak at the position where the gas flow contacts with the plasma.

研究分野：核融合学、プラズマ理工学

キーワード：超音速ガスパフ デタッチメント 大型ヘリカル装置 プラズマ実験 線強度法 二次元計測 高速カメラ ヘリオトロン

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込め核融合炉では、ダイバータと呼ばれるプラズマ対向部の熱負荷を軽減する必要がある。そのために、輻射損失を増大させるなどしてダイバータに流入するプラズマを冷却し、ダイバータから切り離す「デタッチメント (非接触化)」の手法を確立することが求められている。本研究代表者らは大型ヘリカル装置 (LHD) における実験で、燃料ガスを入射して周辺部密度を増大した時にデタッチメントが自己保持される状態が発現する場合のあることを見出し、これをサーパンスモードと名付けた。サーパンスモードは周辺部密度が到達可能な限界値に達し、周辺部温度が閾値 (約 100 eV) まで低下した場合に発現する。しかしながら、密度限界近傍での運転はプラズマを放射崩壊させる危険性が高い。本研究代表者らはまた一方で、核融合プラズマへの燃料粒子供給手法として超音速ガス入射法 SSGP (SuperSonic Gas Puff) の研究も行ってきた。SSGP では超音速ガス流を発生するラバールノズルから数十気圧の高圧燃料ガスを噴出させ、収束性の高い超音速ガスジェットをプラズマに入射する。SSGP を用いた場合、通常の場合 (Gas Puff, GP) 使用時と同じ周辺部密度にも拘わらず周辺部温度が低くなる傾向が LHD で観測された。これは SSGP で局所的に周辺部密度が増加されたと考えれば説明できる。計測している密度と温度は磁気面平均されたものとして良いが、密度に比べ温度が平均化される時定数が短いならば、局所的に密度が増加することで磁気面平均密度が増加しなくても磁気面平均温度は低下し得る。この局所的密度増加は未観測だが、これが事実であれば過度な周辺部密度増大を伴わないデタッチメントの実現が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、トーラス型磁場閉じ込めプラズマに対し、収束した超音速ガス流を入射することでプラズマをダイバータから切り離すデタッチメントの物理機構を解明し、新手法として確立することにある。超音速ガス流によって局所的に密度を増大することでプラズマ全体の周辺部を冷却して輻射損失を増大、再結合を促進しデタッチさせる。これにより、核融合炉では必須のプラズマ閉じ込め性能に影響を与えないデタッチメント制御が可能となる。

3. 研究の方法

LHD の真空容器内にラバールノズルを接続した高速応答ソレノイドバルブを設置し、プラズマに向けて超音速ガス流を供給する。超音速ガス流による局所的密度変動を検証するため、電離過程を高速カメラで二次元分光計測し、局所的な密度及び温度分布の変化を高時間分解で求めると同時に、プラズマの応答を干渉計や静電プローブ等で計測する。

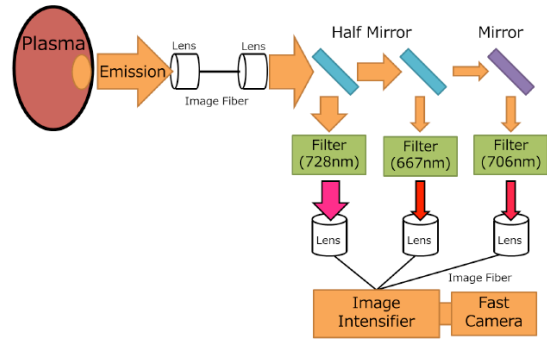


図1 光学系概要図。

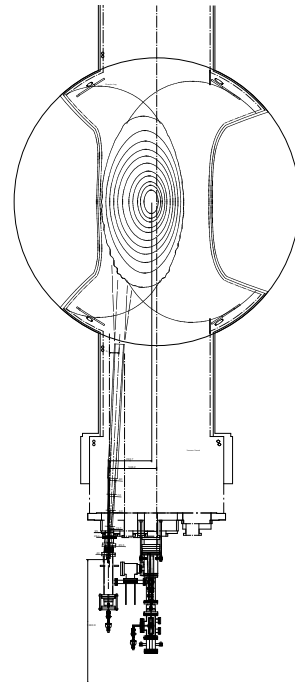


図2 長尺ラバールノズルの取付図 (上) 及び写真 (下)。

本研究では同一視野像をハーフミラーにより分岐し、それぞれ干渉フィルターを通してから増幅した画像を高速カメラの CCD 上に並べて投影することで同時計測を行った。干渉フィルターの波長は、ヘリウム線強度比法による温度及び密度計測を行うため、667 nm、706 nm、及び 728 nm を選択した。図1に光学系の概要を示す。

平成24年度に実施した予備実験では、LHDの真空ポート面近傍に設置したラバールノ

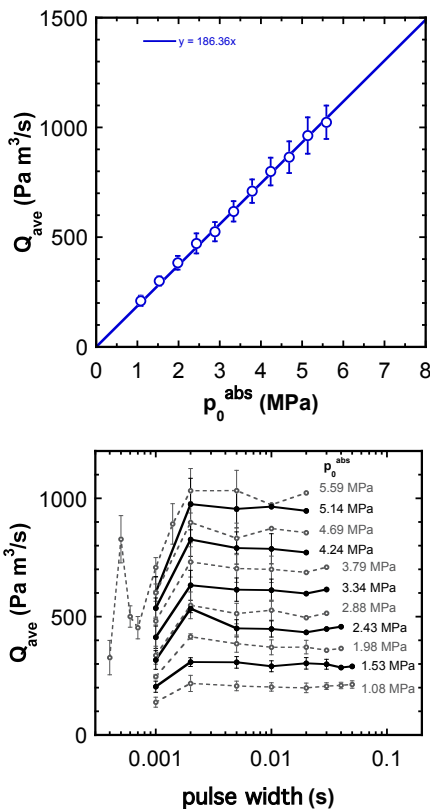


図3 ソレノイドバルブの流量特性（上）及びパルス特性（下）。ガス種は水素。

ズルからプラズマまでの距離が3 m程度と遠かったため超音速ガス流が発散してしまい、プラズマとの接触面積が通常のパフと同程度にまで広がっていた。本研究の目的を達成するためには収束した超音速ガス流をプラズマに供給することが必要なため、全長2.4 mの長尺ラバールノズルを設計・製作し、実験に用いた。長尺ラバールノズルのLHDへの取付図及び写真を図2に示す。この改造によってラバールノズルからプラズマまでの距離はおよそ0.8 m程度となった。

#### 4. 研究成果

LHDでのプラズマ実験に先立ち、長尺ラバールノズルを取り付けない状態でのソレノイドバルブの流量特性等をテストスタンドで取得した。ソレノイドバルブの流量は一次側にかかる圧力に比例して増大する（図3（上））。プラズマ実験では基本的に一次圧を5 MPaとした。この時の流量は水素でおよそ900 Pa・m<sup>3</sup>/sである。ソレノイドバルブの流量は2 ms以上のパルス幅であればほぼ一定となる（図3（下））。より短いパルス幅でも動作はするが、流量は一定とならず、開き遅れや閉じ遅れが発生していると考えられる。

長尺ラバールノズルから超音速のヘリウムガスをLHDプラズマに入射している様子の写真を図4（右）に示す。同じポートから通常のパフを行った場合は、ガス流が広がっているため、図4（左）に示したようにプラズマの楕円形状の下半分全体が発光し

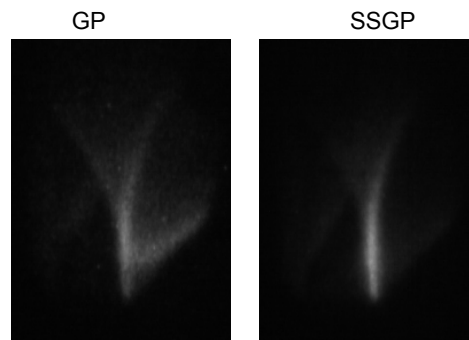


図4 LHDのプラズマに対し、ヘリウムガス入射を行った場合の発光の様子。それぞれ、左は通常のパフ（GP）、右は超音速ガス入射（SSGP）の場合。

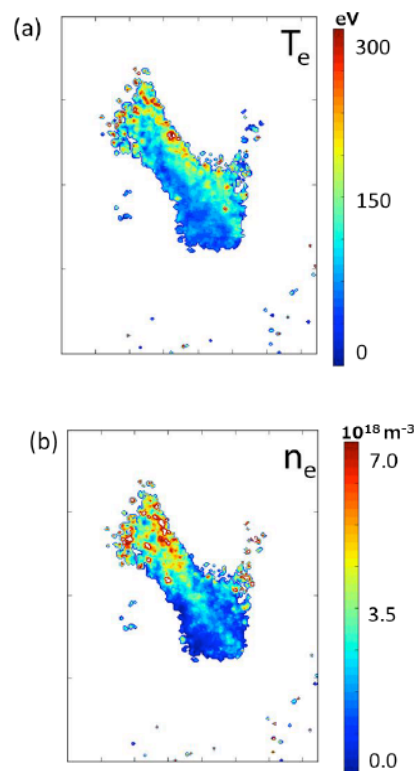


図5 SSGPによるヘリウムビームプローブ実験で、ヘリウムの線強度比を用いて求めた(a)温度及び(b)密度の二次元分布。

ているように観測される。これに対し超音速ガス入射を行った場合は、楕円の一部のみがほぼ直線状に発光している様子が観測された。これは超音速ガス流が収束していることを示す証拠となる。

ヘリウムの発光分布から線強度比法を用いて求めた電子温度と電子密度の二次元分布を図5に示す。高温のプラズマ閉じ込め領域はヘリウムが完全電離してしまうために計測できていないが、その周辺のエルゴディック層と呼ばれる領域での電子温度及び電子密度の分布が得られた。これらの絶対値はトムソン散乱計測で求められたものとほぼ一致している。図5(a)の電子温度分布にはブ

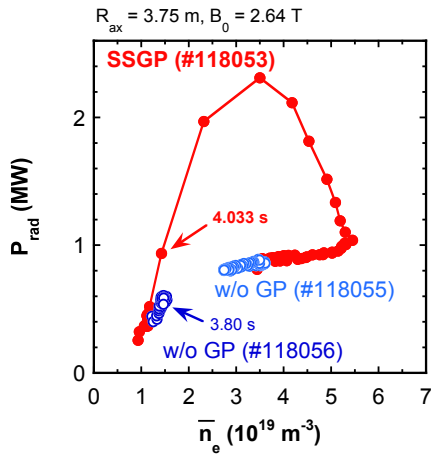


図 6 超音速ガスパフ時 (SSGP, closed circles) 及びガス入射なし (w/o GP, open circles) の各場合における線平均電子密度と輻射損失の関係。

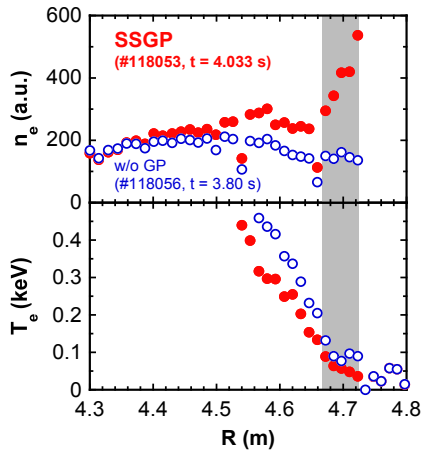


図 7 図 6 と同じ超音速ガスパフ時 (SSGP, closed circles) 及びガス入射なし (w/o GP, open circles) の各場合においてトムソン散乱により計測された電子密度 (上) 及び電子温度 (下) の径方向分布。

ラズマ閉じ込め領域の楕円構造と同心と考えられる層構造が認められる。これはエルゴディック領域においても連続的な圧力分布が存在するという、これまでにトムソン散乱計測で観測されてきた結果と矛盾しない。実際に LHD ではエルゴディック層における電子温度・電子密度分布も閉じ込め領域から外挿した磁気面関数として近似して記述することが一般的に行われている。一方、図 5 (b) の電子密度分布には層構造ではなく、SSGP とプラズマの接触箇所をピークとする分布が認められる。これは、この局所電子密度が電子温度と同様の磁気面関数として記述できないことを意味するものである。

図 6 に、プラズマの線平均電子密度と輻射損失の関係を示す。これは超音速ガスパフによって  $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  程度から電子密度を増大した場合の例であるが、輻射損失は 0.5 MW から一旦 2 MW 以上まで急激に増大する。

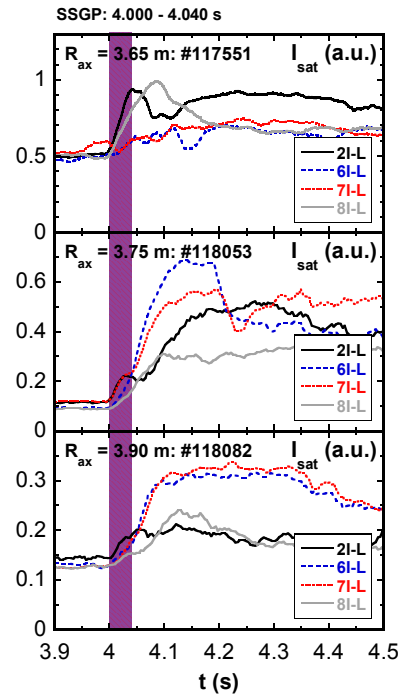


図 8 異なる磁場配位において観測された SSGP 時のダイバータイオン飽和電流のトロイダル/ポロイダル異方性の例。

SSGP によるガス供給自体はこの密度増大フェーズの時定数に比べて短時間で完了している。その後、電子密度増大が続く一方で輻射損失は減少し、更に電子密度が減少するようになると輻射損失も減少する。この両者が共に減少する最終フェーズにおける線平均電子密度と輻射損失の関係は、ガス入射を行っていない放電 (密度は真空容器壁からのリサイクリングによって保たれている) で観測されるものと同様になっている。ガス入射なしの場合に比べ SSGP 時の輻射損失が大きいフェーズにおける電子密度及び電子温度の大半径方向分布の比較を図 7 に示す。これらは SSGP を行ったポートと隣接するポートにおけるトムソン散乱計測により求められたものである。SSGP 時、特に  $R \sim 4.7 \text{ m}$  付近においてガス入射なしの場合よりも電子密度が高く、電子温度は低くなっている。プラズマ閉じ込め領域を規定する最外殻磁気面は  $R \sim 4.6 \text{ m}$  に位置しており、その外側のエルゴディック層において SSGP による電子密度増大が顕著となっている。電子温度が 200 eV 程度以下の領域では、酸素や炭素などの軽不純物イオンからの輻射損失が大きくなる。SSGP によってこの領域の密度が増大し、温度が減少したことによって輻射損失が増大したと考えられる。

SSGP を行った場合、ダイバータにおいて静電プローブにより計測されたイオン飽和電流にトロイダルあるいはポロイダル方向の異方性が観測された。図 8 にその例を示す。この異方性は、磁気軸大半径などが異なる磁場配位において、それぞれ異なった振る舞いを見せる。図 8 では磁気軸大半径が異なると



SSGP 直後にイオン飽和電流の増大が観測されるポートの場所と波形が変化することが示されている。これは SSGP とプラズマが接触する場所からダイバータまで、どのように磁力線が接続されているかの違いを反映しているものと考えられる。

エルゴディック領域の磁力線は基本的に開いており、閉じた入れ子状の磁気面がない。従って磁気面関数を仮定することはできないが、実験的にはこれを仮定することで現象の理解が進められている。本研究で得られた結果から、局所粒子供給を行った場合、少なくとも電子密度分布は磁気面関数で記述できないこと (図 4 (b))、磁力線構造を反映したトロイダル/ポロイダル異方性が存在すること (図 8) が示された。これは従来のプラズマ周辺領域の物理解釈に注意を喚起するものである。本研究により整備された長尺ラバールノズルは、LHD における基幹的な粒子供給装置として今後も活用される。同時に、これを用いたデタッチメント制御の研究も継続して行っていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① A. Sagara, H. Tamura, T. Tanaka, N. Yanagi, J. Miyazawa, T. Goto, R. Sakamoto, J. Yagi, T. Watanabe, S. Takayama, the FFHR design group, “Helical reactor design FFHR-d1 and c1 for steady-state DEMO”, 査読有, Fusion Engineering and Design **89** (2014) 2114-2120.
- ② J. Miyazawa, Y. Suzuki, S. Satake, R. Seki, Y. Masaoka, S. Murakami, M. Yokoyama, Y. Narushima, M. Nunami, T. Goto, C. Suzuki, I. Yamada, R. Sakamoto, H. Yamada, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “Physics analyses on the core plasma properties in the helical fusion DEMO reactor FFHR-d1”, 査読有, Nuclear Fusion **54** (2014) 043010 (9pp).
- ③ J. Miyazawa, T. Goto, R. Sakamoto, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “An evaluation of fusion gain in the compact helical fusion reactor FFHR-c1”, 査読有, Nuclear Fusion **54** (2014) 013014 (10pp).
- ④ J. Miyazawa, T. Goto, R. Sakamoto, G. Motojima, C. Suzuki, H. Funaba, T. Morisaki, S. Masuzaki, I. Yamada, S. Murakami, Y. Suzuki, M. Yokoyama, B.J. Peterson, H. Yamada, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “Formularization of the confinement enhancement factor as a function of the heating profile for FFHR-d1 core plasma design”, 査読有, Nuclear Fusion **52** (2012) 123007 (10pp).
- ⑤ A. Murakami, J. Miyazawa, C. Suzuki, I. Yamada, T. Morisaki, R. Sakamoto, H. Yamada, and LHD Experiment Group, “Fueling characteristics of supersonic gas puffing applied to large high-temperature

plasmas in the Large Helical Device”, 査読有, Plasma Physics and Controlled Fusion **54** (2012) 055006 (6pp).

[学会発表] (計 17 件)

- ① J. Miyazawa, Y. Yoshimura, S. Kubo, Y. Shimozuma, I. Yamada, T. Goto, M. Yokoyama, R. Seki, and LHD Experiment Group, “Collisionality dependence of electron energy confinement in the mantle region of plasmas with the electron internal transport barrier”, PLASMA Conference 2014, 19pE-2, 18-21 Nov., 2014, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市)
- ② J. Miyazawa, T. Goto, R. Sakamoto, H. Tamura, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “Impact of Energy Confinement Improvement in LHD on the Q-value Expected for the Compact Helical Reactor FFHR-c1”, 24<sup>th</sup> International Toki Conference, P4-01, 4-7 Nov., 2014, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)
- ③ 宮澤順一, 後藤拓也, 坂本隆一, 柳長門, 田村仁, 田中照也, 相良明男, FFHR 設計グループ, “ヘリカル核融合炉のミニマムターゲットは装置サイズによってどう変わるか”, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 20-071, 2014 年 6 月 19-20 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ④ J. Miyazawa, H. Tanaka, S. Masuzaki, T. Akiyama, G. Motojima, Y. Yoshimura, S. Kubo, T. Shimozuma, I. Yamada, N. Ohno, and LHD Experiment Group, “Complete Detachment of Helical Plasmas with the Electron Internal Transport Barrier Sustained by Electron Cyclotron Heating in LHD”, 21<sup>st</sup> International Conference on Plasma Surface Interactions, P1-083, 26-30 May, 2014, 石川県立音楽堂 (石川県・金沢市)
- ⑤ J. Miyazawa, T. Goto, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “コンパクトヘリカル核融合炉 FFHR-c1 における核融合利得の評価”, プラズマ・核融合学会第 30 回年会, 2013 年 12 月 3-6 日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区)
- ⑥ J. Miyazawa, A. Murakami, D. Ogawa, T. Morisaki, H. Tanaka, and LHD Experiment Group, “LHD における長尺ラバールノズルを用いた超音速ガスパフ実験”, プラズマ・核融合学会第 30 回年会, 2013 年 12 月 3-6 日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区)
- ⑦ J. Miyazawa, A. Murakami, D. Ogawa, T. Morisaki, H. Tanaka, and LHD Experiment Group, “Supersonic Gas Puffing Experiment using a Long and High Expansion Ratio Laval Nozzle in LHD”, 23<sup>rd</sup> International Toki Conference, 18-21 Nov., 2013, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)

- ⑧ 小川大輔, 森崎友宏, 村上昭義, 宮澤順一, LHD 実験グループ, “ヘリウムビームプローブによる LHD 周辺プラズマの二次元計測”, 日本物理学会第 68 回年会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県・東広島市)
- ⑨ 森崎友宏, 小川大輔, 村上昭義, 宮澤順一, 蓮池祐紀, 岡本和也, 大嵩智裕, 蔦川生璃, 後藤基志, 吉村信次, “トラス周辺プラズマ計測用ヘリウムビームプローブの開発”, 日本物理学会第 68 回年会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 東広島キャンパス (広島県・東広島市)
- ⑩ 宮澤順一, 後藤拓也, 増崎貴, 吉村泰夫, 久保伸, 鈴木千尋, 鈴木康浩, 横山雅之, 相良明男, FFHR 設計グループ, “加熱分布による閉じ込め改善効果の定量評価と直接分布外挿法への導入”, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 28 日, クローバープラザ (福岡県・春日市)
- ⑪ 村上昭義, 宮澤順一, 小川大輔, 森崎友宏, 山田一博, 後藤基志, 増崎貴, 坂本隆一, 山田弘司, LHD 実験グループ, “大型ヘリカル装置における超音速ガスパフ中の周辺プラズマの局所的な振舞い”, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 28 日, クローバープラザ (福岡県・春日市)
- ⑫ J. Miyazawa, A. Murakami, S. Masuzaki, T. Morisaki, M. Goto, Y. Yoshimura, S. Kubo, C. Suzuki, Y. Suzuki, M. Yokoyama, H. Yamada, and LHD Experiment Group, “Energy Confinement of Completely Detached Plasmas Fueled by Supersonic Gas Puffing in LHD”, 22<sup>nd</sup> International Toki Conference, 21 Nov., 2012, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)
- ⑬ A. Murakami, J. Miyazawa, S. Sakakibara, T. Akiyama, Y. Suzuki, S. Ohdachi, S. Masuzaki, T. Morisaki, R. Sakamoto, H. Yamada and the LHD Experiment Group, “ELM frequency control using high frequency supersonic gas puffing in LHD”, 22<sup>nd</sup> International Toki Conference, 21 Nov., 2012, セラトピア土岐 (岐阜県・土岐市)
- ⑭ J. Miyazawa, T. Goto, A. Sagara, and the FFHR Design Group, “Design Study of a Helical Type Nuclear Test Machine”, 1<sup>st</sup> IAEA DEMO Programme Workshop, 15-18 Oct., 2012, University of California at Los Angeles, Los Angeles (USA)
- ⑮ J. Miyazawa, M. Yokoyama, Y. Suzuki, Y. Masaoka, S. Murakami, S. Satake, T. Goto, R. Seki, M. Nunami, H. Funaba, I. Yamada, C. Suzuki, R. Sakamoto, G. Motojima, H. Yamada, and A. Sagara, “Multifarious Physics Analysis of the Core Plasma Properties in a Helical DEMO Reactor FFHR-d1”, 24<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy

Conference, 12 Oct., 2012, Hilton San Diego Bayfront Hotel, San Diego (USA)

- ⑯ 宮澤順一, 後藤拓也, 舟場久芳, 鈴木千尋, 横山雅之, 鈴木康浩, 相良明男, “FFHR-d1 炉心プラズマ設計のための直接分布外挿法に基づくデータ抽出手法について”, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 29 日, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市)
- ⑰ 村上昭義, 宮澤順一, 鈴木千尋, 山田一博, 後藤基志, 森崎友宏, 坂本隆一, 山田弘司, “LHD における超音速ガスパフを用いた粒子供給に関する研究”, 第 9 回核融合エネルギー連合講演会, 2012 年 6 月 29 日, 神戸国際会議場 (兵庫県・神戸市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮澤 順一 (MIYAZAWA, Junichi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 50300728

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

本島 徹 (MOTOJIMA, Gen)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 00509507

森崎 友宏 (MORISAKI, Tomohiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号: 60280591

後藤 基志 (GOTO, Motoshi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 00290916

庄司 守 (SHOJI, Mamoru)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 00280602

小林 政弘 (KOBAYASHI, Masahiro)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 30399307

秋山 毅志 (AKIYAMA, Tsuyoshi)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号: 80370138

増崎 貴 (MASUZAKI, Suguru)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
研究者番号: 80280593